

平成 21年 5月 20日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540437

研究課題名（和文） 能動型衛星センサーによる雲・エアロゾルの相互作用に関する研究

研究課題名（英文） Study on aerosol-cloud interaction using space-borne active sensor

研究代表者

小林 隆久 (Kobayashi Takahisa)

気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 室長

研究者番号：40343892

研究成果の概要：

雲は太陽光を反射し気候に大きな影響を与えている。しかし、その特性は大気中のエアロゾルや降水により大きく変わるため、まだ不明な点が多い。本研究では、太陽反射率等の算定や雨滴形成に重要な要素である雲粒サイズが全球でどのような特徴を持っているか衛星を用いて調べた。その結果、雲粒サイズが降水の有無により大きく変わることで、また雲粒臨界サイズと呼ばれる、ある大きさを境に雲光学的厚さと雲粒サイズの関係が正から負の相関に反転するなど興味深い事実が明らかになった。これらは雲とエアロゾルや降水の相互作用の解明に役立つもので、気候予測のモデル化に繋がる知見が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	0	1,000,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	0	3,400,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：衛星センサー、能動型センサー、雲、エアロゾル、降水

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化予測において最も不確かな問題の一つが雲である。雲は太陽光を遮り地球を冷却化する一方で地面からの熱赤外線が宇宙に逃げるのを妨げ地球を暖める効果がある。どちらの効果が卓越するかは高度や雲粒サイズ等により決まる。特に最近注目されているのが雲粒サイズの効果で、同じ雲水量でも雲粒サイズが小さくなると反射率が大きくなり、冷却効果が強まる。この雲粒サイズに大きな影響を及ぼすのが、雲核の役割を持つエアロゾルの濃度である。大都市等汚染源の近くでは多くのエアロゾルが存在するため、雲核も多く雲粒の平均サイズは小さくなる。一方大都市から離れた海洋上では汚染

も無く清浄大気でエアロゾルも少ないため大きな雲粒の雲が存在すると言われている (Breon et al., 2002, Nakajima, et al., 1995)。雲粒サイズの減少は降水の抑制にも繋がる。降水は雲量をコントロールしており、降水抑制は雲の長寿命化をもたらすため気候に大きな影響を与える。これはエアロゾルの間接効果と呼ばれているもので、実態は $0 \sim -2 \text{ W/m}^2$ と見積もりの幅は広くまだ不明な点が多い。二酸化炭素の放射強制力 1.5 W/m^2 程度をうち消す冷却効果にも相当しており、温暖化予測精度向上のためには雲・エアロゾルの問題を避けることはできない。現在、モデルによる研究が盛んに行われており、間接効果のモデル化も近い将来可能ともいえる。しか

し、雲とエアロゾル・降水の実態は不明な点も多く、その理解には、なお観測的研究、と特に衛星による全球での実態把握が不可欠である。

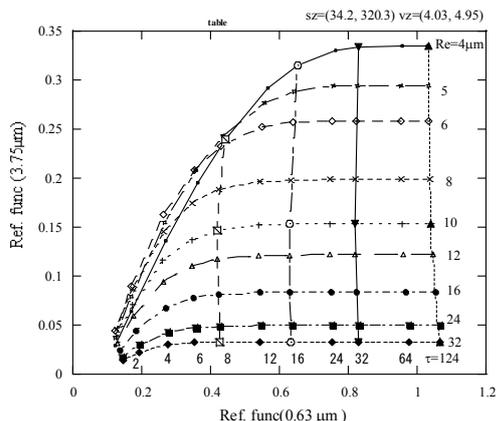
2. 研究の目的

本提案は、能動型衛星センサーと受動型センサーの複合利用という、これまで我が国ではほとんど成されていない技術を開発し、雲・降水を観測し、それらの相互作用、エアロゾル間接効果のモデル化に繋がる知見を目差すものである。雲粒が雨滴へと成長するためには、ある臨界サイズを超えることが必要である。逆にいうとエアロゾル増加により雲粒が臨界サイズ以下になると降水が抑制されることになる。臨界サイズは数値モデルを用いてこれまでに多く研究されているが、実際の大气で存在するのか、またその大きさについてはまだ観測されていない。臨界サイズは、エアロゾル間接効果の理解増進においてのキーファクターであり、衛星データを用いて臨界サイズが存在するか、その大きさについて全球的に調べる。また、エアロゾル間接効果の検証で重要な雲粒サイズと雲の光学的厚さの相関関係や降水生成過程における雲特性の変化について統計的に明らかにする。

3. 研究の方法

エアロゾルの間接効果を知る上で重要な点は、(1) どの程度雲粒サイズが小さくなると降水抑制がもたらされるのか、(2) 雲の光学的厚さと有効半径 (3次モーメント/2次モーメント) の相関関係の実態はどうなっているのか、を把握することである。(1) は間接効果のモデル化に必要である。(2) の関係は間接効果が実際に起きているかの検証に重要なため航空機や衛星を用いて調べられているがバラツキが大きく明確な相関は得られていない。

このために衛星を用いて全球、大量のデータを収集し解析する。雲光学的厚さおよび有効半径は可視・赤外放射計の可視および近赤外チャンネルの放射輝度から抽出できる。本研究では $0.63\mu\text{m}$ および $3.75\mu\text{m}$ から放射伝達モデルを用いて抽出する。第1図に2チャンネル輝度データから雲特性を抽出するダイアグラムを示す。横軸が $0.63\mu\text{m}$ 、縦軸が $3.75\mu\text{m}$ の反射関数を示す。雲粒粒形分布として対数正規分布を仮定し、種々の光学的厚さおよび有効半径に放射伝達方程式を用いて計算した結果を示してある。この図により2チャンネルの観測値から雲光学的厚さと有効半径を同時に推定することができる。降水は熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM) 搭載の降雨レーダーにより可視・赤外放射計と同時刻、同一場



第1図 衛星搭載放射計から雲光学的厚さおよび有効半径を推定するダイアグラム。縦軸、横軸は各 $3.75\mu\text{m}$ 、 $0.63\mu\text{m}$ の放射輝度(反射関数)。

所でのデータを収集し、雲特性との比較を行った。

上述した衛星データからエアロゾルの光学的厚さ、有効半径を抽出するための放射伝達モデル、地表面特性モデル、非球形粒子の散乱モデルなどを開発すると共に、衛星データ処理プログラムを開発した。衛星データの多くは HDF(Hierarchical Data Format)と呼ばれる特殊な形式で保存されており、通常IDL等のツールを用いて解読されている。しかし、本研究では気候値のような高度処理データではなく生データに近い低レベルの大量のデータを利用・解析するため、高速でHDF形式のデータを読み込むためのプログラムを開発した。

4. 研究成果

熱帯降雨観測衛星搭載の能動型センサーである降雨レーダーおよび受動型センサーである可視・赤外放射計の複合利用により、同一地点、同一時刻の降水強度および雲微物理特性(粒径、光学的厚さ)について調べた。調べたデータは2002年12月および2003年6月の計20日間である。その結果、以下のことが分かった。

(1) 臨界雲粒サイズ

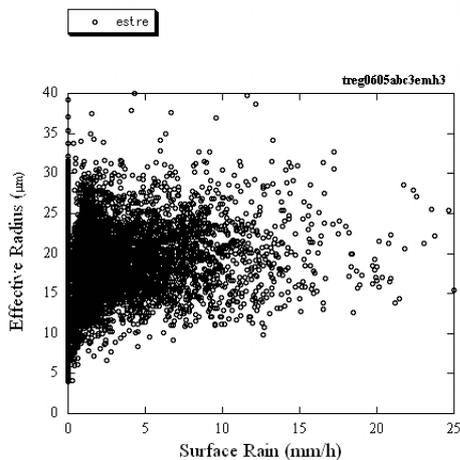
前述したように雲粒が雨滴へと成長するためには、ある臨界サイズを超えることが必要である。逆にいうとエアロゾル増加により雲粒が臨界サイズ以下になると降水が抑制されることになる。実際の大气においても臨界半径のメカニズムが存在するならば、非降水の雲の雲粒半径は臨界半径より小さいことが予想される。一方降水を伴う雲では臨界半径よりずっと大きい雲粒が存在されるはずである。第2図は有効半径と降水強度の散

布図で予想に反し明確な相関は見られない。これは、プロットしたデータには雲、降水の種々のステージが含まれているため、相関関係がマスクされたしまったものと考えられる。

第3図は、雲粒有効半径を地表降水強度の小さい順に並べ替えてプロットしたもので、降水を伴う雲と伴わない雲とで雲粒サイズに違いがあるのかを調べたものである。実線が降水強度（右側の軸）を示す。2003年6月夏季の10日分のデータをプロットしてある。横軸のData No. が0から約16000までが降水強度=0、すなわち降水を伴わない雲を表す。降水を伴う雲と伴わない雲とで有効半径が不連続にジャンプしていることがわかる。降水を伴わない雲では、有効半径はほとんどが20 μm以下なのに対し、降水を伴う雲は20 μmから30 μmまでの雲粒も多く存在しており、雲粒が降水へと発達する雲粒サイズの臨界サイズに関連するものと考えられる。

降水を伴わない雲では、光学的厚さの小さい順にプロットしているが、有効半径はほとんど0から20 μmに分布しており大きな変化はない。降水を伴う雲では20 μmから30 μmまでの雲粒が多いにもかかわらず、降水を伴わない雲でほとんど存在しないことは、このサイズ領域の雲粒の寿命が降水を伴わない雲において短いことを示唆している。前述したように雲粒は連続的に雨滴へと発達しない。ある臨界サイズまでは雲粒はゆっくりと成長するが、臨界サイズを越えると急速に雨滴へと成長する。数値モデルで言われていたこの臨界サイズが、実際の雲・降水システムでも存在することを第3図は示している。またそのサイズは15 μmから20 μmの間と考えられる。

第4図は、有効半径の頻度分布で降水を伴う雲と伴わない雲についてプロットしてある。明確に降水雲で大きい雲粒が多いこと



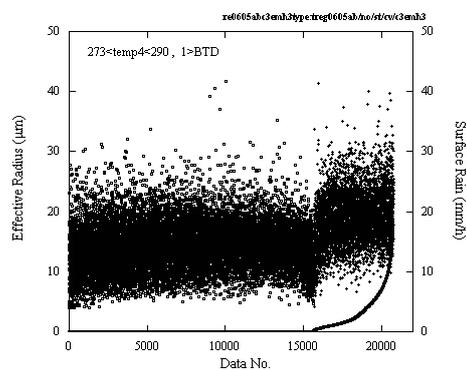
第2図 有効半径と降水強度の散布図

が分かる。

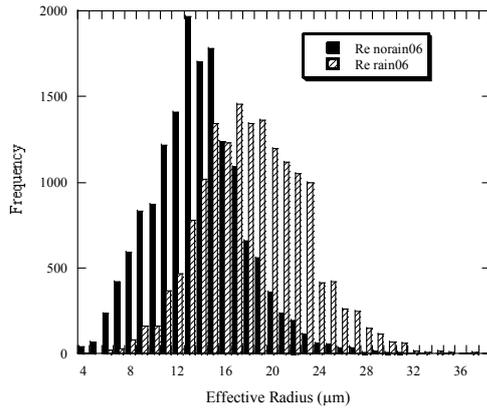
(2) 雲光学的厚さ、有効半径の関係

第5図は有効半径と光学的厚さの散布図である。青い点が降水を伴わない雲、赤い点は降水を伴う雲の場合である。このような図はこれまでも多くの報告がある。船の排気によりエアロゾル濃度が増え、船の航跡にそって海上にできる層積雲では明瞭な負の相関が得られ、エアロゾル間接効果のためと言われているが、一般には明瞭な相関は得られていない (Harshvardhan, 2002)。これは、雲生成過程により正負の相関が可能のためである。凝結により成長する場合、雲粒サイズの増加は光学的厚さを小さくする効果がある。しかし、凝結により雲水量が増加し光学的厚さを大きくする効果が雲粒サイズ増大の効果より卓越するため正の相関となる。また、一方、前述した間接効果や降水があると負の相関になるとも言われている。第5図では明確な相関は見られないが有効半径 17 μm程度で光学的厚さはピークとなることが分かる。

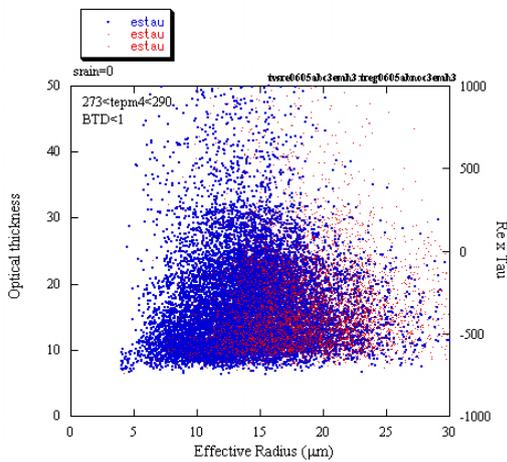
第6図は、光学的厚さと有効半径の平均をとりプロットしたものである。図中NPCが降水を伴わない雲、PRCが降水を伴う雲を表す。いずれの場合も有効半径 17 μm程度で光学的厚さがピークとなることが明確に分かる。光学的厚さと有効半径の関係は17 μm程度で正の相関から負の相関へと変化している。17 μmは臨界半径に相当し、その大きさ以下では正、それ以上では負の相関関係が見出された。雲成長メカニズムが有効半径 17 μmを境に変わるため、(1)で述べた非降水雲と降水雲とで有効半径が大きく変わることを裏付けるものである。これまで光学的厚さと有効半径の関係は内外で多く調べられてきたが明確な相関は得られていなかった。有効



第3図 有効半径を降水強度の順にプロット。実線が降水強度（右側の軸）でData No. 0から約16000までが非降水雲を表す (Kobayashi, 2007)。



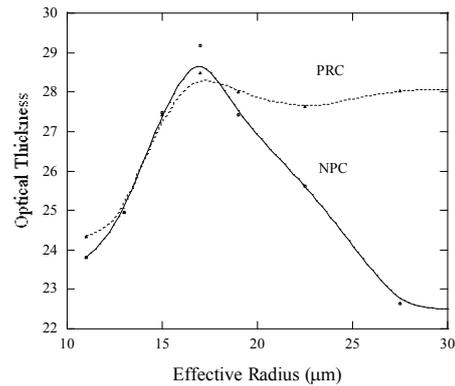
第4図 雲の有効半径のヒストグラム。黒いバーが降水を伴わない雲、白いバーが降水を伴う雲。



第5図 雲の有効半径と光学的厚さの散布図。青い点が降水を伴わない雲、赤い点が降水を伴う雲の場合を示す。

半径 $17\mu\text{m}$ で相関が変わることがその理由であることが明確になった。降水を伴う雲、伴わない雲での雲粒サイズの変化は、この臨界半径が実際の気中でも存在することを示唆している。なお PRC、大きいサイズで光学的厚さが一定なのは lwc が増加したためである。

この降水に伴う有効半径の顕著な変化は雲粒粒径分布の変化も伴っていると考えられる。そこでさらに詳細に解析を行ったところ、雲粒から雨滴へと発達する過程において粒径分布の幅が広がっていると考えられる結果が得られた。粒径分布の広がり、太陽反射率を小さくする働きがあり、エアロゾル間接効果の正確な見積りに重要である。



第6図 平均雲光学的厚さと平均有効半径の関係。実線が降水を伴わない雲、点線が降水を伴う雲を示す(Kobayashi and Masuda, 2008)。

これらの結果について国内外の学会で発表すると共に、国内誌および国際誌に投稿、掲載された。

(3) まとめ

衛星搭載能動型・受動型センサーの複合利用により、雲と降水特性を全球で調べた。その結果、雲粒有効半径は降水を伴う/伴わない雲で激変するという興味深い事実が観測された。これはこれまで雲粒・雨滴生成過程を扱う数値モデルで指摘されていた雲粒臨界サイズを示すもので、衛星を用いて全球で初めて観測されたものである。臨界半径は、数値モデルでは $15\text{-}20\mu\text{m}$ と言われているが、本研究でも非降水の雲の雲粒半径は $15\text{-}20\mu\text{m}$ に抑えられていることが明瞭に観測できていた。

また、有効半径と光学的厚さの関係も臨界半径を境に相関が反転するという興味深い特性が明らかになった。これまで両者の相関はエアロゾルの間接効果の検証に重要なため、数多く調べられてきたが明瞭な関係は得られていなかった。臨界半径を考慮することで正と負の相関が混在している関係を分離でき、明確な関係が得られるものと期待できる。

衛星搭載能動型・受動型センサーの複合利用により、雲・降水を全球で観測しエアロゾルの間接効果に関する知見の向上を果たすことができた。

参考文献

- Breon, F-M., D. tanre, and S. Generoso, (2002), Aerosol effect on cloud drop size monitored from satellite, *Science*, 295, 3556-3576.
- Harshvardhan, S. E. Schwartz, C. M. Benkovitz, and G. Guo (2002), Aerosol influence on cloud microphysics examined by satellite measurements and chemical transport modeling, *J. Atmos. Sci.*, 59, 714-725.
- Nakajima, T. Y., and T. Nakajima (1995), Wide-area determination of cloud microphysics properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions, *J. Atmos. Sci.*, 52, 4043-4059.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件) 査読有

- ① Kobayashi, T., 2006, Precipitation and cloud properties derived from synergetic use of the TRMM sensors, Proceedings of SPIE, 6404-12.
 - ② Ishimoto, H., 2006, Effect of minor deformation for the light scattering of ice and aerosol particles, Proceedings of SPIE, 6408-53.
 - ③ Kobayashi, T., 2007, Significant differences in the cloud droplet effective radius between non-precipitating and precipitating clouds, *Geophysical Research Letters*, 34, L15811
 - ④ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2008, Effects of precipitation on the relationships between cloud optical thickness and drop size derived from space-borne measurements, *Geophysical Research Letters*, 35, L24809, doi:10.1029/2008 GL036140.
 - ⑤ Masuda, K. and T. Kobayashi, 2008, Relation between cloud optical thickness and precipitation derived from space-borne measurements, *Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds II*, Proc.of SPIE Vol. 7152 71520N-1~11.
 - ⑥ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2009, Spectral broadening effects of cloud droplet size distributions on the optical thickness derived from TRMM satellite, *J. Meteor. Soc. Japan*, (in press.)
 - ⑦ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2009, Effects of precipitation on cloud optical thickness derived from combined passive and active space-borne sensors, *Current Problems in Atmospheric Radiation*, 267-270..
 - ⑧ Masuda, K., and T. Kobayashi, 2009, Ice cloud properties over precipitation area derived from a combined use of active and passive satellite sensors, *Current Problems in Atmospheric Radiation*, 291-294..
- [学会発表] (計 10 件)
- ① Kobayashi, T., 2006, Significant differences in the cloud droplets effective radius between non-precipitating and precipitating clouds, ABSTRACTS of 4th European Conf. on Radar Meteorology and Hydrology, Barcelona, Spain.
 - ② Kobayashi, T., and A. Adachi, 2007, Satellite measurements of precipitation and critical size of cloud droplets, 33rd Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia.
 - ③ Kobayashi, T., 2007, Cloud-precipitation interaction and radiometer measurements, 2007 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Amsterdam, Netherlands..
 - ④ 小林隆久, 小野木茂, 2007: 雲粒臨界半径の衛星による観測—エーロゾル間接効果に関連して—. *日本気象学会 2007 年度秋季大会講演予稿集*, 札幌.
 - ⑤ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2008, Cloud properties in rain formation process observed by space-borne active and passive sensors, 2008, Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Helsinki, Finland.
 - ⑥ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2008, Effects of precipitation on cloud optical thickness derived from combined passive and active space-borne sensors, 2008 International Radiation Symposium, Foz do Iguacu, Brazil.
 - ⑦ Masuda, K., and T. Kobayashi, 2008, Ice cloud properties over precipitation area derived from a combined use of active and passive satellite sensors, 2008 International Radiation Symposium, Foz do Iguacu, Brazil.
 - ⑧ Kobayashi, T., and K. Masuda, 2008, Relation between cloud optical thickness and

precipitation derived from space-borne measurements, 2008, SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Nov, 2008, New Caledonia.

- ⑨ 小林隆久、2008、衛星で観測した雲光学的厚さと雲粒サイズに及ぼす降水の影響、日本気象学会秋季大会、仙台
- ⑩ 増田一彦、小林隆久、2008、能動・受動センサの複合による降水域での氷晶雲の特徴抽出、日本気象学会春季大会、横浜

[図書] (計 1 件)

小林隆久、2007、次世代センサハンドブック、p1072 倍風館

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 隆久

気象庁気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 室長

研究者番号：40343892

(2)研究分担者

増田 一彦

気象庁気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 室長

研究者番号：90354513

青木 輝夫

気象庁気象研究所 物理気象研究部 室長

研究者番号：30354492

石元 裕史

気象庁気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 主任研究官

研究者番号：70281136

井上 豊志郎

気象庁気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 室長

研究者番号：90343889

(H18-19)

(3)連携研究者